

Impulse der Kopernikus-Projekte | 2019

NACHHALTIGES ENERGIESYSTEM AUF KURS BRINGEN



KOPERNIKUS
»PROJEKTE
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Autorinnen und Autoren

P2X

- › Julia Biermann, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.: julia.biermann@dechema.de
- › Prof. Dr. Rüdiger A. Eichel, Forschungszentrum Jülich GmbH / RWTH Aachen University: r.eichel@fz-juelich.de
- › Dr. Andreas Förster, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.: andreas.foerster@dechema.de
- › Prof. Dr. Walter Leitner, RWTH Aachen University: leitner@itmc.rwth-aachen.de
- › Dr. Sabrina Müller, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.: sabrina.mueller@dechema.de
- › Prof. Dr. Kurt Wagemann, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.: kurt.wagemann@dechema.de

ENSURE

- › Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka, Karlsruher Institut für Technologie: president@kit.edu
- › Dr. Witold-Roger Poganietz, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Karlsruher Institut für Technologie: witold-roger.poganietz@kit.edu
- › Univ.-Prof. Dr. Albert Moser, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, RWTH Aachen: a.moser@iaew.rwth-aachen.de
- › Dr. Sylvio Kosse, Siemens AG: sylvio.kosse@siemens.com
- › Dr. Veronica Biagini, Forschungszentrum ABB AG: veronica.biagini@de.abb.com
- › Dr. Tobias Pletzer, Schleswig-Holstein Netz AG: tobias.pletzer@sh-netz.com

SynErgie

- › Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der Technischen Universität Darmstadt: abele@ptw.tu-darmstadt.de
- › Dennis Bauer, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: dennis.bauer@ipa.fraunhofer.de
- › Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl, Kernkompetenzzentrum Finanz- und Informationsmanagement FIM und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik FIT: hans-ulrich.buhl@fim-rc.de
- › Heribert Hauck, TRIMET Aluminium SE: heribert.hauck@trimet.de
- › Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer, Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) an der Universität Stuttgart: alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de
- › Paul Schott, Kernkompetenzzentrum Finanz- und Informationsmanagement FIM und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik FIT: paul.schott@fim-rc.de

ENavi

- › Prof. Dr.-Ing. Kai Hufendiek, Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy / Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung: kai.hufendiek@ier.uni-stuttgart.de
- › Dr. Christoph Kost, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: christoph.kost@ise.fraunhofer.de
- › Dr. Michael Pahle, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung: michael.pahle@pik-potsdam.de
- › Dr. Dirk Scheer, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Karlsruher Institut für Technologie: dirk.scheer@kit.edu
- › Maïke Schmidt, Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy / Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg: maike.schmidt@zsw-bw.de
- › Prof. Dr. Ortwin Renn, IASS – Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung: ortwin.renn@iass-potsdam.de

Herausgeber

Geschäftsstelle des Kopernikus-Projekts
Energiewende-Navigationssystem | ENavi
Institute for Advanced Sustainability
Studies e. V. (IASS)
Berliner Straße 130
14467 Potsdam
Tel: +49 (0) 331 - 2 88 22 - 300
Fax: +49 (0) 331 - 2 88 22 - 310
www.iass-potsdam.de
E-Mail: enavi-media@iass-potsdam.de
www.kopernikus-projekte.de/enavi

Verantwortliche Redakteure

Prof. Dr. Ortwin Renn:
ortwin.renn@iass-potsdam.de
Dr. Stefan Stüeckrad:
stefan.stueckrad@iass-potsdam.de
Christina Camier:
christina.camier@iass-potsdam.de

Layout

Christina Camier, IASS

Stand: September 2019

Bildnachweis

S. 4: ©TRIMET Aluminium SE; S. 5: ©IASS,
Foto: C. Camier; S. 6: ©Hydrogenious Techno-
logies; S. 9: ©TenneT TSO GmbH; S. 11:
©RWTH Aachen University; S. 12: ©PTW/TU
Darmstadt; S. 14: ©IASS, Foto: P. Chiussi

Druck

Printsystem GmbH, Schafwäsche 1-3,
71296 Heimsheim

INHALT

1. Impulse für die Energiewende	5
2. P2X: Umwandlung von Strom in hochwertige Energieträger	6
3. ENSURE: Praxistaugliche Energienetzstrukturen	9
4. SynErgie: Flexibilisierte Stromnachfrage in der Industrie	12
5. ENavi: Dialog mit der Gesellschaft	14

TRENDWENDE

Die Ziele der Klima- und Energiepolitik sind ambitioniert: Die Treibhausgasemissionen müssen bis zum Jahr 2030 um 55 Prozent, bis 2050 um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 gesenkt werden. 90 Prozent der Bevölkerung stimmen der Energiewende zu, aber die Mehrheit kritisiert die Umsetzung¹.

Kopernikanische Wende in der Energieforschung

Zur Forschung für die Energiewende fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) seit Herbst 2016 vier Kopernikus-Projekte: ENSURE, P2X und SynErgie bringen Innovationen und technologische Entwicklungen voran. ENavi integriert diese in den systemtechnischen, sozioökonomischen, institutionellen und kulturellen Hintergrund.

Als Forschungswerkstatt für die Energiewende in der Praxis sollen sie einem kohlenstoffdioxidarmen Energiesystem mit entscheidenden Impulsen zum Durchbruch verhelfen. In den Kopernikus-Projekten arbeiten mehr als 240 Partner aus Wissenschaft, Industrie und Zivilgesellschaft zusammen.

Mehr Informationen: www.kopernikus-projekte.de

¹ Setton, D. (2019): *Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energiewende 2018: Kernaussagen und Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse*. IASS – Institute for Advanced Sustainability Studies. Potsdam



P2X liefert wichtige Beiträge zur Nutzung von erneuerbarem Strom in den Sektoren Mobilität und Chemie. **ENSURE** durchleuchtet neue Energienetzstrukturen. **SynErgie** erprobt die Flexibilisierung von Industrieprozessen. **ENavi** verknüpft wissenschaftliche Analysen mit politisch-gesellschaftlichen Anforderungen.

1. IMPULSE FÜR DIE ENERGIEWENDE

P2X

Mehr als ein Drittel des Stroms in Deutschland stammt heute aus erneuerbaren Quellen, zum Beispiel aus Windkraft oder Photovoltaikanlagen. Damit ist ein wichtiger Schritt für die Energiewende getan, innerhalb welcher fossile Energieträger wie Kohle oder Gas durch erneuerbar erzeugten Strom ersetzt werden sollen. Denn bei der Verbrennung von fossilen Rohstoffen gelangt viel Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre, das den Klimawandel beschleunigt. Erneuerbare Energien produzieren während ihrer Nutzungsphase dagegen kein CO₂. Ihr Nachteil: Strom entsteht nur, wenn die Sonne scheint oder genug Wind weht. Deshalb entwickeln über 330 WissenschaftlerInnen und IngenieurInnen im Kopernikus-Projekt Power-to-X (P2X) Technologien, mit denen CO₂ und Wasser unter Einsatz von erneuerbarem Strom in Kraftstoffe und Chemikalien umgewandelt werden können. Damit kann der CO₂-Gehalt der Atmosphäre in der Zukunft gesenkt werden.

ENSURE

Zukunftsfähige, multimodale Energiesystemstrukturen müssen heutigen Anforderungen und Ansprüchen hinsichtlich Versorgungszuverlässigkeit, Flexibilität und Stabilität sowie System-

sicherheit genügen. Zusätzlich müssen sie auch die angestrebte CO₂-neutrale, ökonomisch vertretbare und hochflexible Energie bereitstellen können. Die Digitalisierung der Versorgungsstrukturen ermöglicht die Umsetzung neuer Methoden und Strategien in einem volatilen Umfeld und trägt so zu einer zuverlässigen, stabilen und ökonomischen Systemführung in der Zukunft bei. Für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende unter diesen Gesichtspunkten sind insbesondere die Ergebnisse der Arbeiten aus ENSURE hervorzuheben. Die identifizierten Netzstrukturen und die untersuchten neuen Systemführungskonzepte wurden durch die parallele technologische Entwicklung von Primär- und Sekundärtechnologien ergänzt.

SynErgie

Das Kopernikus-Projekt SynErgie trägt durch eine umfassende Identifikation, Weiterentwicklung und Quantifizierung des Flexibilitätspotenzials der Stromnachfrage in der deutschen Industrie zur Energiewende bei. Um die Industrie zur Nutzung dieses Flexibilitätspotenzials zu befähigen, wurden Konzepte und Technologien erforscht, entwickelt, umgesetzt und erprobt. Darüber hinaus wurden Handlungsempfehlungen erarbeitet, um die regulatorischen Hemm-

nisse abzubauen, damit die Industrie das vollumfängliche Flexibilitätspotenzial nutzen kann. Zwei Initiativen zur Nachwuchsqualifikation, das Doktoranden-seminar und das Visit-the-Best-Programm, leisten einen entscheidenden Beitrag zur Qualifikation herausragender Nachwuchskräfte, um die Energiewende auch zukünftig erfolgreich umsetzen zu können.

ENavi

Das Kopernikus-Projekt Energiewende-Navigationssystem, kurz ENavi, sieht die Transformation des gegenwärtigen Energiesystems in ein weitgehend CO₂-freies und auf erneuerbaren Energien basierendes System als einen gesamtgesellschaftlichen Prozess. ENavi verknüpft wissenschaftliche Analysen mit politisch-gesellschaftlichen Anforderungen. Zentrales Produkt ist eine Navigationshilfe, mit der die Forschenden die Wirkungen und Nebenwirkungen von wirtschaftlichen, politischen, rechtlichen oder sozialen Maßnahmen im Voraus abschätzen wollen. Wesentliches Kennzeichen von ENavi ist das Zusammenwirken von Systemwissen (was bewirkt was?), Orientierungswissen (wo soll es hingehen?) und Transformationswissen (wie kommt man am besten dahin?).



2. P2X: UMWANDLUNG VON STROM IN HOCHWERTIGE ENERGIETRÄGER

- › **Elektrolyse** bezeichnet eine chemische Reaktion, bei der ein Ausgangsstoff mithilfe von elektrischem Strom in höherwertige energetische Bausteine gespalten wird.
- › Ein **Katalysator** führt eine chemische Reaktion herbei, beschleunigt sie oder bestimmt, welches der möglichen Produkte hauptsächlich gebildet wird (Selektivität der Produkte), und liegt nach der Reaktion unverändert vor.
- › **Synthesegas** ist ein industriell hergestelltes Gasgemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff.

Die zentralen Technologien des Power-to-X-Konzepts beruhen auf elektrolytischen und katalytischen Reaktionen. Durch die Elektrolyse werden die Ausgangsstoffe CO_2 und Wasser in Zwischenprodukte umgewandelt, die anschließend in katalytischen Reaktionen zu chemisch höherwertigen Verbindungen, zum Beispiel zu synthetischen Kraftstoffen oder Kunststoffen, umgesetzt werden.

Der Überbegriff Power-to-X fasst unterschiedliche Verfahren zur Umwandlung von Strom zusammen:

- › Power-to-Gas: Herstellung von gasförmigen Substanzen (zum Beispiel Wasserstoff oder Methan)
- › Power-to-Liquids: Herstellung von flüssigen Energieträgern (zum Beispiel Kraftstoffe)
- › Power-to-Chemicals: Herstellung von Grundstoffen und Produkten der chemischen Industrie.

In der ersten dreijährigen Förderphase des Projekts bis Mitte 2019 haben die Forschenden vielversprechende P2X-Technologien und Konzepte ausgearbeitet. In der folgenden Förderphase wollen sie diese weiterentwickeln, um die Technologien marktreif zu machen und im Rahmen von Wertschöpfungsketten für die Herstellung von chemischen Produkten zu erproben.

Wasserelektrolyse – Wie man Kosten und Rohstoffe spart

Die Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff ist ein sehr energieaufwändiger Power-to-X-Teilprozess. Um ihn wirtschaftlicher und kostengünstiger zu machen, entwickeln WissenschaftlerInnen der Technischen Universität München (TUM) gezielt neue Elektrodenmaterialien, die weniger teure Edelmetalle enthalten und möglichst die Leistung noch steigern.

Dies kann durch intelligentes Materialdesign, beispielsweise durch eine größere aktive Oberfläche, erreicht werden, an welcher die chemische Reaktion stattfindet. In der PEM-Elektrolyse, bei der eine Protonenaustauschmembran die beiden

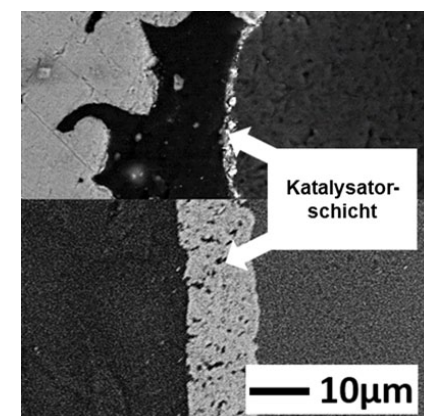


Abbildung 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Übergangs von Elektroden- zu Membranmaterial (Technische Universität München)

Elektroden voneinander trennt, bildet sich Wasserstoff an der Kathode und Sauerstoff an einer Iridium-basierten Anode. In der ersten Förderphase des Projekts wurde die Menge des eingesetzten Iridiums bei gleichbleibender Leistung um einen Faktor Zehn reduziert.

Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt den Querschnitt einer Elektrode, hergestellt mit einem kommerziellen Katalysatormaterial (oberer Teil der Abbildung) im Vergleich zu einer Elektrode mit gleicher Beladung ($0,2 \text{ mg Iridium pro cm}^2$), hergestellt aus einem neu entwickelten Katalysatormaterial (unterer Teil der Abbildung). Aufgrund des intelligenten Materialdesigns des neuen Katalysatormaterials ist es trotz kleiner Beladungen möglich, eine homogene Elektrodenschicht herzustellen.

Rheticus – Eine Power-to-X-Idee kommt in die Anwendung

Das Rheticus-Forschungsprojekt wurde auf der Basis frühzeitig erzielter sehr guter Ergebnisse in der ersten Phase des Kopernikus-Projekts P2X gemeinsam von Evonik und Siemens ins Leben gerufen. Sie entwickeln zusammen eine Versuchsanlage, welche „grüne“ Chemie aus CO_2 und Strom aus erneuerbaren Quellen mithilfe von Bakterien realisieren soll. Die so hergestellten Spezialchemikalien, wie beispielsweise Butanol oder Hexanol, sind unter anderem Ausgangsstoffe für Spezialkunststoffe oder Nahrungsergänzungsmittel. Aber auch andere Spezialchemikalien oder synthetische Treibstoffe könnten mögliche Produkte sein. Das eigenständige Projekt startete Anfang 2018 als ein Satellitenprojekt der Kopernikus-Initiative und wird vom Bundesforschungsministerium gefördert.

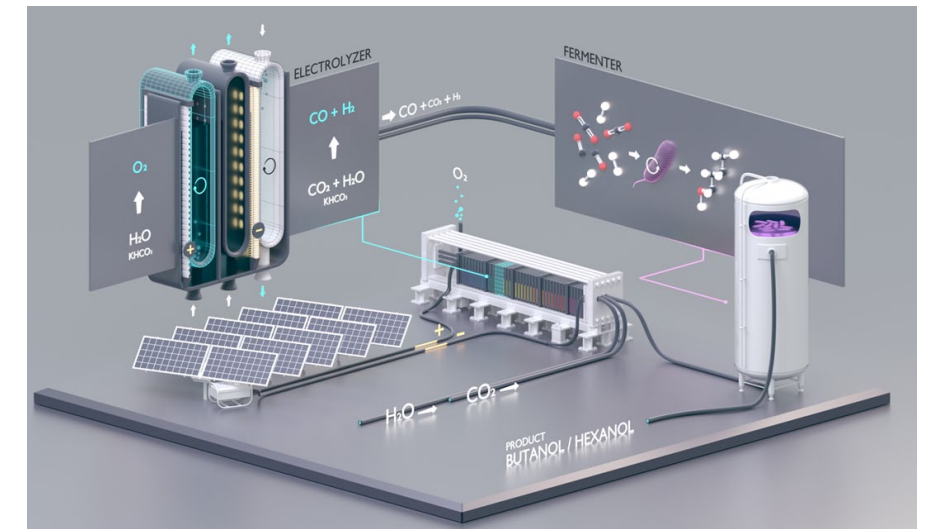


Abbildung 2: Rheticus – Etablierung einer Wertschöpfungskette durch Kombination von Co-Elektrolyse und Fermentation (Haas, T.; Krause, R.; Weber, R.; Demler, M.; Schmid, G. (2018) in: *Nature Catalysis* 1, S. 32–39)

Prämierte Start-ups

Die im Forschungsverbund beteiligten Start-ups entwickelten ihre Technologien weiter und bieten heute erfolgreich marktfertige Lösungen an. Zwei der Start-ups sind hierfür ausgezeichnet worden.

INERATEC GmbH hat mikrostrukturierte Reaktoren entwickelt, mit denen verschiedene Power-to-X-Prozesse so kompakt wie noch nie umgesetzt werden können. Unter anderem wird Synthesegas in Verbindungen und Gemische umgewandelt, wie beispielsweise synthetischer Dieselmotorkraftstoff. Die sehr kompakten Reaktoren werden durch das Start-up in transportable Containeranlagen verbaut und können so dezentral und mobil eingesetzt werden. Auf diese Weise kann die Anlage leicht an Orte transportiert werden, an denen

ausreichend Strom aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht oder an denen aufgrund fehlender Infrastruktur keine ausreichende Versorgung mit Kraftstoffen möglich ist. Das Unternehmen erhielt den ersten Platz des Deutschen Gründerpreises 2018 in der Kategorie „Start-Up“.

Hydrogenious Technologies bietet Lösungen zur sicheren Wasserstoff-Speicherung, zum Wasserstoff-Transport und dessen Freisetzung an. Die Technologie nutzt LOHCs (liquid organic hydrogen carriers), ungiftige schwer entflammbare flüssige Substanzen, um Wasserstoff chemisch zu binden und am Ort der Anwendung wieder mithilfe von speziellen Katalysatoren freizusetzen. Das Unternehmen kam unter die Top Drei des Deutschen Zukunftspreises 2018.



Hochtemperatur-Co-Elektrolyse – Der Klimakiller CO₂ wird zum wertvollen Rohstoff

Am Forschungszentrum Jülich wird die Hochtemperatur-Co-Elektrolyse, die direkte einstufige Umwandlung von CO₂ und Wasserdampf mit Strom zu Synthesegas, erforscht. Die Reaktion erfolgt bei sehr hohen Temperaturen um 800 Grad Celsius. Das auf diese Weise hergestellte Gasgemisch aus CO und Wasserstoff enthält die Bausteine Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff. Synthesegas ist folglich ein wichtiges Zwischenprodukt zahlreicher petrochemischer Prozesse. Während der ersten Kopernikus-Förderphase zeigten die Forschenden, dass sich das H₂-CO-Verhältnis im Synthesegas über eine Bandbreite von vier zu eins bis eins zu eins durch variierende Zusammensetzung der Wasserdampf-CO₂-Eingangsmischung einstellen lässt. Es ist somit möglich, ein maßgeschneidertes Synthesegas herzustellen. Die gewünschten Gaszusammensetzungen können hierbei mit hohen Stromdichten und hoher Effizienz erzeugt werden.

Dehydrierung von LOHCs – Ein neuer Katalysator erleichtert die Wasserstofffreisetzung

Als weiteres Highlight der erfolgreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Kopernikus-Projekt P2X wurde im Forschungsbereich „Dezentrale H₂-Logistik: Speicherung und Verteilung über flüssige Wasserstoffträger (LOHC)“ eine neue Katalysatorgeneration für die Dehydrierung des flüssigen Wasserstoffträgers Perhydro-Dibenzyltoluol (LOHC+) für den industriellen Einsatz qualifiziert. Dieser Erfolg war durch die enge Zusammenarbeit der akademischen Partner Friedrich-Alexander-Universität (FAU), Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und RWTH Aachen University sowie der beiden Industriepartner Hydrogenious Technologies und Clariant möglich. Die

akademischen Partner führten grundlegende reaktionstechnische und spektroskopische Arbeiten durch. Für die industriellen Anwendungstests war der Industriepartner Hydrogenious Technologies verantwortlich. Clariant, als weiterer Industriepartner, entwickelte erfolgreich die Produktion des Katalysators und stellt diesen nun im kommerziellen Maßstab her. Der neue Dehydrierkatalysator ist unter dem Produktnamen „EleMax D101“ bekannt. EleMax D101 ist aufgrund seiner überlegenen Freisetzungsraten, seiner sehr hohen Edelmetall-Effizienz und seiner hervorragenden Selektivität als neuer industrieller Standard für die technische Wasserstofffreisetzung aus LOHC+ anzusehen.

Power-to-X-Anlage – Modular und kompakt

Am Karlsruher Institut für Technologie bauten WissenschaftlerInnen und IngenieurInnen des Instituts für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) sowie der Unternehmen Climeworks AG, Sunfire GmbH und INERATEC GmbH eine modulare Containeranlage für den dezentralen Einsatz auf und nehmen diese derzeit in Betrieb. Die Anlage ist das weltweit erste Beispiel für ein vollintegriertes P2X-System, das alle Prozessschritte von der Gewinnung des Ausgangsstoffes CO₂ aus der Umgebungsluft bis hin zur Synthese der Endprodukte – CO₂-neutrale synthetische Kraftstoffe – durchführt.

Vier unterschiedliche Schritte werden hierfür synergetisch gekoppelt: die CO₂-Gewinnung aus der Luft, die Hochtemperatur-Co-Elektrolyse von CO₂ und Wasserdampf zu Synthesegas, dessen Umwandlung in Kohlenwasserstoffe über die Fischer-Tropsch-Synthese erfolgt, und die hydrierende Behandlung der Kohlenwasserstoffe, um die Ausbeute und die Qualität der gewünschten flüssigen Kraftstoffe zu maximieren. Die

stoffliche und thermische Kopplung der einzelnen Prozessschritte ermöglicht eine hohe Energieeffizienz und eine fast hundertprozentige Umwandlung des aus der Luft gewonnenen CO₂ in flüssige Kraftstoffe. Im Versuchsbetrieb wird es möglich sein, kontinuierlich etwa 10 Liter synthetischen Kraftstoff pro Tag zu produzieren. In der nächsten Projektphase sollen weiterentwickelte Anlagen gebaut werden, die ebenfalls modular aufgebaut sein werden und mit unterschiedlichen Reaktorkonzepten verschiedene Produkte herstellen können. So könnte eine Anlage in der Nähe einer Tankstelle synthetische Kraftstoffe und eine Anlage in der Nähe eines Herstellers von Kunststoffen die benötigten Spezialchemikalien liefern.

Roadmap

Die Roadmap wurde begleitend zu den technischen Forschungsarbeiten im Kopernikus-Projekt P2X von der DECHEMA erstellt. Sie verfolgt die Entwicklungen der verschiedenen P2X-Technologien und analysiert sie im Sinne der ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit. Die Ergebnisse aus den Bewertungsarbeiten fließen wieder in die weiterführenden Entwicklungsphasen der Technologien mit ein, sodass diese auch im Sinne dieser Aspekte beeinflusst werden. Die Potenziale von stofflichen Power-to-X-Energieträgern werden aufgezeigt und in das bestehende Energiesystem eingeordnet. Für eine erfolgreiche und gesamtgesellschaftlich akzeptierte Energiewende ist es wichtig, die Forschungsarbeiten und -ergebnisse offen, auch außerhalb des Projekts, zu diskutieren. Nur mit einer gut informierten Gesellschaft lassen sich wichtige Entscheidungen treffen, welche die Energiewende maßgeblich beeinflussen. Im Rahmen der Aktivitäten zur Roadmap werden hierzu auch Dialoge insbesondere mit Jugendlichen geführt.

3. ENSURE: PRAXISTAUGLICHE ENERGIENETZSTRUKTUREN

In zukünftigen Energienetzstrukturen wird die dezentrale Energieerzeugung mit erneuerbaren Energien (EE) eine entscheidende Rolle spielen. Dafür ist ein Umbau der Stromnetze hin zu stark vermaschten Strukturen notwendig, was intelligente und effiziente Netzbetriebsmittel für den Aufbau und den Betrieb von hybriden AC- und DC-Netzen notwendig macht. Verstärkt wird dieser Effekt durch die steigende Zahl der direkt in die Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetze integrierten Erzeugungsanlagen, Speicher und Power-to-X-Anlagen, die einen bidirektionalen Lastfluss erforderlich machen. Je nach eingeschlagenem Transformationspfad können die spezifischen Anforderungen an dieses „Energienetz der Zukunft“ allerdings erheblich abweichen.

In der ersten Förderphase bis Mitte 2019 ermittelten die Forschenden bei ENSURE die sozioökonomischen Rahmenbedingungen und gesellschaftlich akzeptablen Transformationspfade für einen solchen Netzbau, die dann als Grundlage für die Ausarbeitung möglicher Systemstrukturen im „Energienetz der Zukunft“ dienten. Diese System-szenarien für den Netzbau wurden anschließend in einer umfassenden Systemstudie nebeneinandergestellt, die alle relevanten Energieträger und Gegebenheiten in Deutschland berücksichtigt. Parallel entwickelten die Forschenden ein gesamtheitliches Konzept für die Systemführung der zukünftigen

Energienetzstrukturen sowie intelligente Netzbetriebsmittel. Um die Machbarkeit einer solch umfassenden Transformation der Netzstrukturen zu belegen, haben die Forschenden bei ENSURE außerdem den Bau eines Netzdemonstrators „Energiekosmos ENSURE“ angestoßen, der die unterschiedlichen Forschungsstränge in einem gemeinsamen praxistauglichen Konzept zusammenführt und für eine breite Öffentlichkeit fassbar macht.

Transformationspfade für die Energiewende

In einem partizipativen Prozess wurden gemeinsam mit VertreterInnen unter-

schiedlicher Spitzenverbände aus der Gesellschaft und Industrie zunächst mögliche Entwicklungspfade für die Energieversorgung entworfen. Insgesamt wurden dabei vier sogenannte Storylines entwickelt: Die Storyline A „Referenz“ basiert auf dem Netzentwicklungsplan (NEP) Strom aus dem Jahr 2017. In dieser Storyline sollen die Treibhausgas (THG)-Emissionen in Deutschland bis 2030 um 52 Prozent gegenüber 1990 sinken. Das Ambitionsniveau der Storyline B „Ambitionierter Klimaschutz“ zielt dahingegen auf eine Limitierung der Effekte des Klimawandels auf einen Temperaturanstieg von 1,5 Grad Celsius ab.

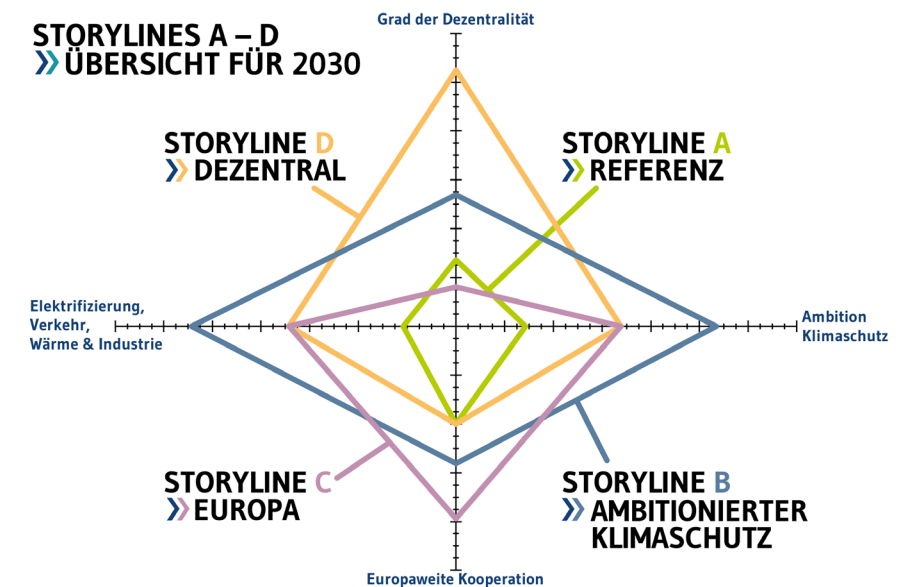


Abbildung 3: Schematisches Vorgehen zur Bewertung von Zentralität und Dezentralität einer Netzstruktur (SH-Netz AG)



Die THG-Emissionen müssten bis 2030 um 78 Prozent sinken. Die Ambitionsniveaus der Storyline C „Dezentral“ und D „Europa“ entsprechen dem Mindestanspruch des Pariser Klimaschutzabkommens. Die THG-Emissionen würden in beiden Fällen um 67 Prozent sinken.

Die überwiegende Mehrheit der beteiligten Stakeholder präferiert die Storyline B, was eine starke Gewichtung des Klimaschutzes bei den beteiligten Spitzenverbänden zeigt. Die Arbeiten zu den Storylines beschreiben einen umfassenden Handlungsraum bis zum Jahr 2030. Erörtert wurden etwa Fragen der Akzeptanz bei der Installation von neuen Netzen, bei der anreizkompatiblen Ausgestaltung des Energiemarktes

und des regulatorischen Rahmens, bis hin zur Problematik fehlender Handwerkerkapazitäten bei der energetischen Gebäudesanierung. Die Ergebnisse verdeutlichen das Ausmaß an notwendigen Maßnahmen in allen Sektoren. So liegt der Bedarf an neuen EE-Anlagen in allen Storylines über den aktuellen Zielen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes.

Ausgestaltung der neuen Netzstrukturen

Ausgehend von den vier Storylines wurden dann in einer breiten Systemstudie vier mögliche Strukturen des Energieversorgungssystems zur Realisierung der Energiewende abgeleitet. Berücksichtigt wurden die Energieträger Elektrizität, Gas, Wärme und flüssige Kraftstoffe. Die Storylines gaben dabei die Marktstruktur, den Primärenergieeinsatz, den Endenergieverbrauch sowie den notwendigen Ausbau der Energiespeicher und der Anlagen zur Energieumwandlung bereits vor. Die beiden verbleibenden Stellschrauben bei der Ausarbeitung der Systemstrukturen – nämlich die genaue Ausgestaltung der Netze sowie der Informations- und Kommunikations-

technik (IKT) – wurden innerhalb der Systemstrukturen für eine optimale raumzeitliche Verteilung von Energie und Leistung genutzt.

Die unterschiedlichen Systemstrukturen, die sich aus den Storylines ergaben, wurden anschließend hinsichtlich ihrer jeweiligen Zentralität und Dezentralität bewertet. Hierfür wurden die vorwiegend qualitativen Einschätzungen aus den Storylines um quantitative Kenngrößen ergänzt, die mittels Simulationen ermittelt wurden. Diese Kenngrößen werden je Merkmal abgeleitet und hinsichtlich einer eher zentralen oder dezentralen Charakteristik bewertet. Als Ergebnis können nun vier verschiedene Systemstrukturen auf Basis unterschiedlicher Ausprägungen in spezifischen Kenngrößen hinsichtlich Zentralität und Dezentralität miteinander verglichen werden. In diesem Zusammenhang wurden auch bereits Geschäftsmodelle für Netzbetreiber und Flexibilitätsanbieter vorgeschlagen, die ein netzdienliches Verhalten fördern.

Neue Systemführungskonzepte

Auch mit der Systemführung zukünftiger Energienetzstrukturen haben sich die Forschenden bei ENSURE bereits intensiv beschäftigt. So wurde ein IKT-Gesamtkonzept für die zukünftigen flexiblen Netzstrukturen mit integrierten leistungselektronischen Komponenten entwickelt. Dabei wurde auch auf Sicherheitsaspekte geachtet: Ein neuartiges Schutzkonzept, das Digital System Protection Design (DSPD) inklusive Werkzeugkette, ermöglicht neue und flexible Betriebskonzepte durch routinemäßige und automatisierte Adaption der Schutzalgorithmen und Parameter.

Ein wichtiger Bestandteil des ausgearbeiteten IKT-Gesamtkonzepts ist ein

Konzept zur integrierten Betriebsführung sektorengestützter Systeme (Gas-Elektrizitäts-Kopplung, Kraft-Wärme-Kopplung und Power-to-Heat-Anlagen), das ermöglicht, verfügbare Flexibilitäten zu errechnen und zu bewerten. Dadurch lassen sich Grenzwertverletzungen und Netzengpässe im Bestandsnetz bereits während der Planung verhindern. Außerdem wurden im Rahmen des IKT-Gesamtkonzepts Zuverlässigkeitskenngrößen und Methoden zur Bewertung der Versorgungssicherheit und Systemstabilität erarbeitet. Diese bilden einerseits die Grundlage für die Sicherstellung eines versorgungssicheren Betriebs, sie erlauben andererseits aber auch die systematische Analyse der Interaktion von Bestandsinfrastruktur und neuen Komponenten.

Neue Technologien für das „Stromnetz der Zukunft“

Die technologische Weiterentwicklung der Netzbetriebsmittel ist ein wesentlicher Aspekt einer erfolgreichen Energiewende. Einerseits ermöglichen sie die Realisierung vermaschter und hybrider Netzstrukturen sowie eine effizientere Integration der erneuerbaren Energien. Andererseits erhöhen sie die Flexibilität und ermöglichen so eine zuverlässige Steuerung des Netzbetriebs.

Ein zentraler Aspekt lag dabei auf der Erforschung von innovativen Umrichtern für flexible und hybride AC- und DC-Verteilnetze sowie die dazu benötigten Umspannwerke. Dabei wurden etwa neuartige Konzepte verschiedener Stromrichtertopologien für Mittelspannungsnetze untersucht. Neben den klassischen Multilevel-Stromrichtern mit verteilter DC-Zwischenkreisstruktur standen auch neuartige Varianten im Fokus. So konnten beispielsweise kostengünstige

und leistungsstarke 3-Level-Stromrichter mit aktiven Filtern kombiniert werden. Dadurch kann das Volumen und Gewicht des Netzfilters um mehr als 60 Prozent reduziert werden, während die installierte Halbleiterfläche nur um 11 Prozent erhöht werden muss. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Untersuchungen die netzdienlichen Eigenschaften von potenzialtrennenden Netzkupplungen, zum Beispiel leistungselektronikbasierter Transformatoren, erforscht. Beispielsweise wurde ein HVDC-MVDC-Wandler entwickelt, der im Vergleich zur State-of-the-art Topologie 44 Prozent weniger Leistungshalbleiterbauelemente und 49 Prozent weniger Leistungskondensatoren aufweist, die üblicherweise den größten Teil der Kosten verursachen und auch Volumen und Gewicht bestimmen. Durch den Einsatz solcher neuartiger Komponenten wird der Betrieb eines Gleichstromnetzes bei unterschiedlichen Spannungsebenen attraktiv. Übergreifend über alle Anwendungen, Topologien und Spannungsebenen wurden außerdem vielseitige Control Hardware-in-the-Loop Systeme entwickelt, mit denen bereits in einem frühen Entwicklungsstadium umfangreiche Untersuchungen der Netzeigenschaften verschiedener Stromrichter durchgeführt werden können.

Die technologische und wirtschaftliche Entwicklung supraleitender Kabel für die Anwendung im Höchstspannungsnetz bildete einen weiteren Schwerpunkt der technologischen Entwicklungsarbeit während der ersten Förderphase von ENSURE. Dabei wurde eine umfangreiche Studie durchgeführt, aus der hervorgeht, dass eine supraleitende Kabelanlage bereits heute wirtschaftlich sein kann. Im Bereich der IKT-Technologien lag der Fokus auf sicheren und leistungsfähigen Kommunikationsstrukturen sowie

Monitoring- und Diagnosesystemen. Beispielsweise wurde ein thermisches Überwachungssystem für Mittelspannungsschaltanlagen sowie ein dynamisches Verfügbarkeitsmanagement-System für HV-Transformatoren entwickelt, das thermische Modelle nutzt. Hier zeigt sich das Potenzial der Neuentwicklung von Betriebsmitteln, die deutlich flexibler und netzdienlicher als konventionelle Technologien sind.

Auf dem Weg zum „Energiekosmos ENSURE“

Schon während der ersten Förderphase angestoßen wurde außerdem der „Energiekosmos ENSURE“, ein Netzdemonstrator, dessen Realisierung für die dritte Förderphase geplant ist. Dafür wurden die Forschungsergebnisse der Technologieentwicklungen genutzt und mit technischen und gesellschaftlichen Anforderungen sowie den Anforderungen der Zielregion abgeglichen.

Konkret wurde dabei eine Reihe geeigneter Technologien, Konzepte und Verfahren („Use Cases“) ausgewählt. Für die Standortwahl wurde mittels eines fünfstufigen Prozesses eine geeignete Region für die Netzdemonstration innerhalb von Schleswig-Holstein identifiziert. Hierzu wurden technische, ökonomische und gesellschaftliche Kriterien ebenso wie die Einordnung der Region in den europäischen Kontext und die spätere Übertragbarkeit der Ergebnisse berücksichtigt. Im letzten Schritt wurde die Umsetzbarkeit der „Use Cases“ mit der Region abgestimmt sowie Normen und Prüfvorschriften identifiziert. Die Durchführung dieser Prüfungen soll in der zweiten Förderphase erfolgen, um den sicheren Betrieb des „Energiekosmos ENSURE“ zu gewährleisten.

- Netzstrukturen**
 - Transportdistanz
 - ...
- Marktstruktur**
 - Ebene der Koordination der
 - Bilanzierung
 - ...
- Energiespeicher**
 - Räumliche Verteilung der Anlagen
 - ...
- Energieumwandlung**
 - Räumliche Verteilung der Anlagen
 - ...

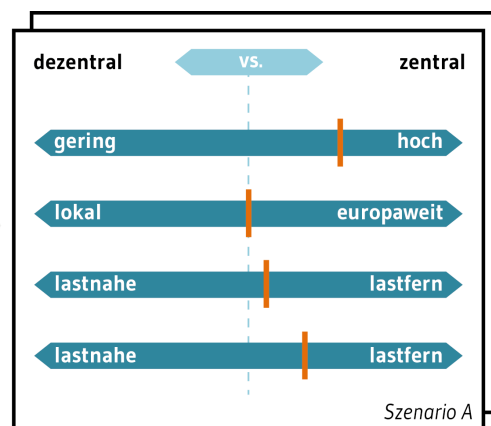


Abbildung 4: Schematisches Vorgehen zur Bewertung von Zentralität und Dezentralität einer Netzstruktur (eigene Darstellung)



4. SYNERGIE: FLEXIBILISIERTE STROMNACHFRAGE IN DER INDUSTRIE

Synchronisation in der Industrie

Das Kopernikus-Projekt SynErgie (Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung) hat sich von September 2016 bis August 2019 damit befasst, in Einklang mit rechtlichen und sozialen Aspekten, technische und marktseitige Voraussetzungen zu schaffen, um den Strombedarf der deutschen Industrie maßgeblich mit dem volatilen Stromangebot zu synchronisieren.

In acht Wirtschaftszweigen¹ wurden 17 Schlüsselproduktionsprozesse und die Produktionsinfrastruktur untersucht, um deren Potenzial zur Stromnachfrageflexibilisierung zu ermitteln. Das zukünftige Flexibilisierungspotenzial für Deutschland wurde über die Schlüsselproduktionsprozesse abgeschätzt. Für einen Zeitraum von bis zu 15 Minuten liegt dieses Flexibilitätspotenzial bei einer Reduzierung der elektrischen Last bei mindestens 2,5 Gigawatt und bei einer Erhöhung der elektrischen Last bei

mindestens 1,1 Gigawatt². Dies ist vergleichbar mit der installierten Leistung des größten deutschen Pumpspeicherkraftwerks bzw. entspricht etwa dem 1,2-fachen der installierten Leistung des größten deutschen Gaskraftwerks. Die jährlich verschiebbare Energiemenge beträgt 1,7 Terawattstunden bei Lastverzicht bzw. 6,7 Terawattstunden bei Lasterhöhung. Das heißt zwei Drittel der realisierten Erzeugung aus deutschen Pumpspeicherkraftwerken im Jahr 2018³ könnten ersetzt werden. Die deutsche Industrie könnte deshalb durch die Stromnachfrageflexibilisierung einen maßgeblichen Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten. Um diese Flexibilität lang- bis mittelfristig auch tatsächlich nutzen zu können, wurden in SynErgie unter anderem neue Technologien sowie Marktmodelle entwickelt und praktisch erprobt. Auf dieser Basis wurden Empfehlungen zur notwendigen Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen erarbeitet.

Flexibilisierung in stromintensiver Aluminiumproduktion

Die Produktion von Aluminium ist einer der stromintensivsten Prozesse in der Wirtschaft. Aluminium wird global aus-

schließlich nach dem 1886 patentierten Hall-Héroult-Verfahren der Schmelzflusselektrolyse aus Aluminiumoxid, der sogenannten Tonerde, bei einer Betriebstemperatur von ca. 960 Grad Celsius gewonnen. Zu den Idealbedingungen des traditionellen Elektrolysebetriebes zählt die rund um die Uhr konstante Stromabnahme. Bei einer volatilen Stromversorgung wäre der Elektrolysebetrieb daher nicht aufrecht zu erhalten. Im Rahmen von SynErgie wurden Technologien entwickelt, die eine Flexibilisierung der Aluminiumelektrolyse dennoch ermöglichen. Hierfür wurde eine Magnetfeldkompensation erforscht, um die störenden Effekte des prozessbedingt starken Gleichstrom-Magnetfeldes zu verringern.

Als Ergebnis dieser Magnetfeldkompensation werden die durch einen veränderlichen Elektrolysestrom verursachten magnetischen Störungen des Prozesses weitgehend eliminiert und so die Voraussetzungen für eine Flexibilisierung geschaffen.

Für eine weitere Steigerung des Flexibilitätspotenzials wurden steuerbare Wärmetauscher entwickelt und gemeinsam mit der Magnetfeldkompensation am Standort Essen der TRIMET Aluminium SE in 120 Elektrolyseöfen installiert. Durch die entwickelten Technologien wird ein Betrieb dieser Aluminiumelektrolyse als Reallabor mit ± 22,5 Megawatt für bis zu 48 Stunden in eine Richtung ermöglicht.

Erfolgreiche FLEX-Elektrolyse

Im Oktober 2018 wurde ein erster Testbetrieb der sogenannten »FLEX-Elektrolyse« erfolgreich durchgeführt. Dabei wurde jeweils über zwei Stunden eine Last von +19 Megawatt und -14 Megawatt verschoben. Die Entwicklung von

Technologien zur Flexibilitätsbefähigung industrieller Prozesse ist deshalb ein wichtiger, kostengünstiger und sozial akzeptierter Treiber der Energiewende. Mit einem von TRIMET Aluminium SE entwickelten Ansatz zur Umwandlung von 100 Prozent Strom aus erneuerbarer Erzeugung zu 100 Prozent Haushaltsstrom könnten alleine mit dem Reallabor der FLEX-Elektrolyse bereits 25.000 Dreipersonenhaushalte und 50.000 Einpersonenhaushalte vollständig mit volatilem erneuerbarem Strom versorgt werden, ohne selbst ihr Verhalten ändern zu müssen. Die Aluminiumhütte übernehme hierbei sekundenscharf die Differenz zwischen volatiler Erzeugung und dem üblichen Verbrauchsprofil der Haushalte.

Marktdesign begrenzt Potenzial

Das derzeitige Design des Markt- und Stromsystems in Deutschland erlaubt die Nutzung der Flexibilität der Aluminiumelektrolyse sowie der in den weiteren Wirtschaftszweigen entwickelten Technologien jedoch nur eingeschränkt. Dies führt dazu, dass das technisch vorhandene Flexibilitätspotenzial nicht im wünschenswerten Umfang zur Systemstabilisierung eingesetzt werden kann. Zur Überwindung der regulatorischen Hemmnisse bedarf es zukünftig insbesondere weiterer Anreize, den Stromverbrauch zu passenden Zeitpunkten zu reduzieren und zu entsprechenden Zeitpunkten zu erhöhen.

Aktuell bieten die Strommärkte für ein solches netz- und/oder systemdienliches Verhalten nur für wenige energieintensive Unternehmen gewisse, teils widersprüchliche Anreize. Kurz- und mittelfristig ist es deshalb notwendig, dass eine sinnvolle Flexibilitätsbereitstellung nicht durch Begrenzungstatbestände verhindert wird. Des Weiteren sind die Möglichkeiten der Flexibilitätsbereit-

stellung zu verbessern, um das Angebot der industriellen Stromnachfrageflexibilität zu erhöhen. Langfristig ist es notwendig, unter Beachtung der komplexen Wirkzusammenhänge im Stromsystem, das Flexibilitätsangebot durch weitreichende Befähigung produzierender Industrieunternehmen zur Flexibilitätsbereitstellung unabhängig von ihrer Energieintensität oder Größe zu erweitern. Diese vorgeschlagenen regulatorischen Änderungen wurden in einem mit den drei Kopernikus-Schwesterprojekten abgestimmten Positionspapier verabschiedet und veröffentlicht. Die Änderungsvorschläge bilden die Grundlage einer umfassenderen Nutzung industrieller Stromnachfrageflexibilität und leisten damit einen wichtigen Anteil zur Gestaltung der Energiewende.

Visit-the-Best

Ergänzt wird das Forschungsprogramm in SynErgie durch zwei Veranstaltungsreihen zur Nachwuchsqualifikation. Jeweils jährlich veranstaltet wurden das Doktorandenseminar und das Visit-the-Best-Programm. Im Rahmen des Doktorandenseminars haben sich die Promovierenden gegenseitig ihre Arbeitsergebnisse vorgestellt und mit einem interdisziplinären Fachpublikum diskutiert. Das Visit-the-Best-Programm mit Stationen im BMW Werk Leipzig, der TRIMET Aluminium SE in Essen und UPM Communication Papers in Schongau hat den Promovierenden und IndustrievertreterInnen die Möglichkeit eröffnet, erfolgreiche Anwender von Energieflexibilitätsmaßnahmen kennenzulernen und gegenseitig Erfahrungen auszutauschen. Beide Initiativen leisten einen entscheidenden Beitrag zur Qualifikation herausragender Nachwuchskräfte für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende.

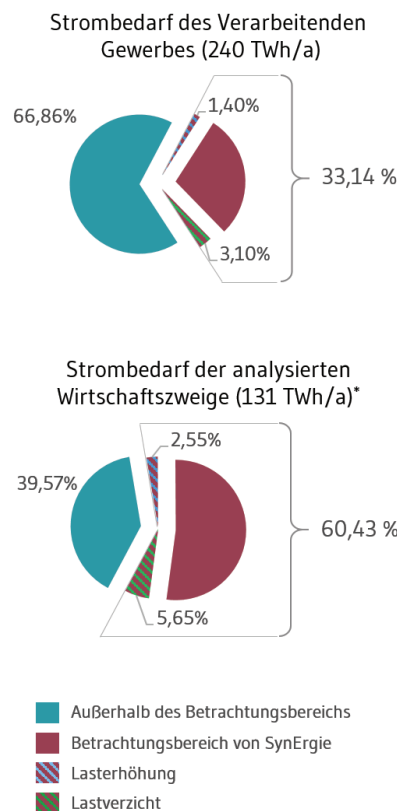


Abbildung 5: Strombedarf des Verarbeitenden Gewerbes und der analysierten Wirtschaftszweige in SynErgie (EEP, Universität Stuttgart; Datenbasis von Destatis, Bezugsjahr 2016)

¹ Herstellung von chemischen Erzeugnissen, Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen, Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln, Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, Herstellung von Metallerzeugnissen, Maschinenbau

² Für kürzere Zeiträume von 1,2 Minuten ergibt sich für die elektrische Lasterhöhung ein Flexibilitätspotenzial von 2,7 Gigawatt und damit mehr als eine Verdopplung, bei 5 Minuten für den elektrischen Lastverzicht von 4 Gigawatt.
³ Zehn Terawattstunden in 2018 (SMARD)



5. ENAVI: DIALOG MIT DER GESELLSCHAFT

Zehn Nachhaltigkeitskriterien

Im Kopernikus-Projekt ENavi entsteht eine Navigationshilfe für eine systemische Energiewende. Politische Entscheidungen, staatliche Fördermaßnahmen, Ordnungsrecht und weitere Instrumente werden als Transformationspfade in einer Road(s)map aufgezeigt. Für Multiakteurs-Dialoge hat ENavi ein interaktives Format entwickelt, das Decision Theater. Diskussionsergebnisse werden mit einer datenbankgestützten Anwendung in Echtzeit auf fünf Monitoren visualisiert. Die Diskutierenden können vor Ort die Ausgangsszenarien mit alternativen Lösungsoptionen vergleichen.

Im Dialog mit AkteurlInnen bewertet ENavi die Maßnahmen anhand zehn zentraler Kriterien: Effektivität, Kosteneffizienz/Gesamtkosten und Resilienz bemessen, ob und mit welchen Kosten einzelne Maßnahmen zu zentralen energie- und klimapolitischen Zielen beitragen. Politische Instrumente werden darauf überprüft, welche (Mitnahme-) Effekte und unerwünschten Nebenwirkungen sie auf wirtschaftliche Planungssicherheit haben und welchen Beitrag sie zur gesellschaftlichen Wohlfahrt leisten. Darüber hinaus messen sie Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, den Ressourcenverbrauch und die Umwelt. Soziale Kriterien umfassen die Förderung des sozialen Zusammenhalts, Legalität, ethische Akzeptabilität und die Legitimität von Eingriffen in das Energiesystem.

CO₂-Preis: Effizienteste Lösung

In Szenarien wurde analysiert, wie das im Klimaschutzplan definierte Ziel, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 90 Prozent zu reduzieren, erreicht werden kann. Die sektorintegrale Betrachtung berücksichtigte die Ziele der Sektoren Wärme und Verkehr und die sich hieraus verändernde Nachfrage nach Strom. Komplexe Simulationsrechnungen wurden im Diskurs mit Stakeholdern aus allen Bereichen der Gesellschaft auf zwei primäre Steuerungsinstrumente fokussiert:

- › Die schnelle Variante eines ordnungsrechtlichen Kohleausstiegs durch Vorgabe eines Ausstiegsfahrplans (KAS).
- › Die Implementierung eines CO₂-Mindestpreises im europäischen Emissionshandelssystem (ETS) für energiewirtschaftliche Anlagen im deutschen Handelsraum (COP).

Beide Handlungsoptionen wurden mit flankierenden Maßnahmen versehen, die unerwünschte Nebeneffekte dämpfen (KAS+ bzw. COP+): a) Eine nationale Stilllegung von CO₂-Zertifikaten, die bei der Reduktion von Emissionen in der deutschen Energiewirtschaft frei werden (ZS); b) eine Reform des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) zur Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien (EE) durch Erhöhung der Ausschreibungsmengen für Versteigerungen (+EE).

Es zeigt sich, dass ein ordnungsrechtlicher Kohleausstieg (KAS-Szenario), der durch die Empfehlungen der Kommission für Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung legitimiert ist, ohne flankie-

rende Maßnahmen erhebliche Kosten generiert, aber in Summe keine Emissionen reduziert. Nur die zusätzlichen Maßnahmen können dieses Problem beheben. Werden CO₂-Emissionen dagegen mit einem angemessenen Preis versehen, kann die Dekarbonisierung der Stromerzeugung ökonomisch und ökologisch effizienter umgesetzt werden.

Ein CO₂-Mindestpreis in Deutschland würde einem Rebound-Effekt entgegenwirken, der beim Abschalten von alten Kohlekraftwerken zur höheren Auslastung moderner Steinkohlekraftwerke und erhöhter Erdgasnutzung führen wird. Beim Rebound-Effekt werden die durch die Stilllegung von Kohlekraftwerken erzielten CO₂-Einsparungen in einem anderen Bereich emittiert⁴.

Auch der Ansatz eines Mindestpreises für CO₂ in Deutschland muss in die europäische Klimapolitik eingebettet werden, das heißt mit entsprechenden flankierenden Maßnahmen versehen werden, um beispielsweise den „Wasserbetteffekt“ zu vermeiden, der zu steigenden Emissionen im europäischen Ausland führt. Dieser resultiert aus dem EU-ETS, bei dem die in einem EU-Land eingesparten Emissionen aufgrund der konstanten Gesamtmenge in einem anderen EU-Land zu erhöhtem CO₂-intensiven Kohle- und Gasverbrauch führt. Werden zusätzlich Emissionszerti-

⁴ vgl. Pahle, M.; Zabel, C.; Edenhofer, O.; Fahl, U.; Fischedick, M.; Hufendiek, K. et al. (2019): *Interdisziplinärer Synthesebericht zum Kohleausstieg: ENavi informiert die Kohlekommission*. In: GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society 28 (1), S. 61–62

fikate in Deutschland stillgelegt und der Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigt, reduzieren sich diese unerwünschten Effekte.

Die Einführung eines CO₂-Mindestpreises – mit einem CO₂-Preis von 30 EUR/t in 2020, 60 EUR/t in 2030 und 120 EUR/t in 2050 – einschließlich flankierender Maßnahmen (COP+) erreicht dieselben Ziele wie das Szenario KAS+ bei insgesamt jedoch deutlich geringeren Gesamtkosten für die Volkswirtschaft. Zum Vergleich: Im KAS+-Szenario betragen die spezifischen Minderungskosten über den gesamten Zeitraum bis 2050 rund 82 EUR/t Kohlendioxid-Äquivalente (CO₂e), im Szenario COP+ dagegen nur ca. 50 EUR/t CO₂e.

Die Belastungen für die Haushalte sind dabei unbedingt zu beachten und die Auswirkungen insbesondere im unteren bis mittleren Einkommensbereich zu berücksichtigen bzw. zu dämpfen: Sie betragen im KAS-Szenario ca. 15,70 EUR pro Haushalt und Monat, bei KAS+ rund 23,20 EUR und beim COP+-Szenario 13,80 EUR – vorausgesetzt, dass die Mehreinnahmen des Staates aus dem CO₂-Preis bei den Haushalten wieder ausgeglichen werden.

Nachfrage nach alternativen Antrieben steigern

Der Klimaschutzplan 2050 sieht vor, im Verkehr bis 2030 40 Prozent weniger Treibhausgase gegenüber 1990 zu emittieren. Pkw mit Verbrennungsmotoren verursachen 60 Prozent der CO₂-Emissionen im Straßenverkehr. ENavi hat Maßnahmen für eine stärkere Nachfrage nach emissionsarmen Antrieben entwickelt.

Ein ambitionierter CO₂-Flottengrenzwert für Fahrzeughersteller und ein CO₂-Preis für fossile Kraftstoffe sollen die Nachfrage nach alternativen Antrieben erhöhen. Bei einem Preis von 150 EUR/t CO₂ im Jahr 2030 erhöht sich die Neuzulassungsquote geringfügig. Höhere Anschaffungskosten wiegen offensichtlich schwerer als höhere Nutzungskosten. Eine Verdopplung des CO₂-Preises auf 300 EUR/t CO₂ könnte die Zulassungen signifikant erhöhen. Parallel lässt der CO₂-Flottengrenzwert das Fahrzeugangebot steigen und die Kosten sinken.

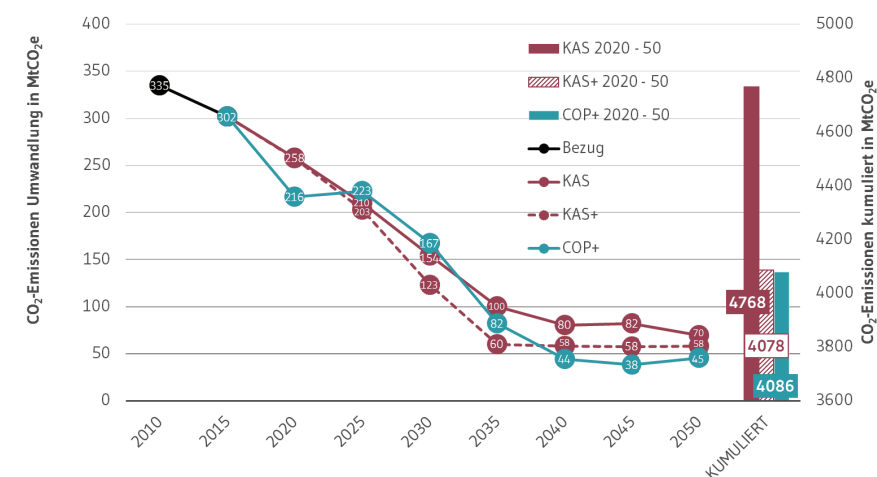


Abbildung 6: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den ENavi-Szenarien (Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy / Institut für Energiewirtschaft)

Höhere Parkgebühren und eine Kfz-Steuer-Reform sollen konventionelle Fahrzeuge zusätzlich verteuern. Der Ausbau intelligenter Ladestationen, kombiniert mit einer Informationskampagne soll dem Reichweiten-Mythos entgegenwirken und die Diffusion alternativer Antriebe dynamisieren.

Ein agentenbasiertes Modell zur Analyse der Investitionsentscheidungen von Haushalten zeigt, dass beim Kauf eines Pkws nicht nur der Kaufpreis, sondern auch individuelle Vorlieben und soziale Netzwerke entscheiden. Bei Early Adopters, die technische Innovationen frühzeitig aufgreifen, bestimmen Innovationsneigung, sozialer Status und soziale Netzwerke, ob sie ein Elektro-, Diesel- oder Benzin-Auto kaufen.

Langfristigkeit im Wärmebereich

Die Wärmeversorgung in Industrie sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistungen verursacht mehr als die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland. Die Kernelemente einer emissionsärmeren Wärmeversorgung sind grundsätzlich bekannt. ENavi hat analysiert, was deren Umsetzung auf techno-ökonomischer, gesellschaftlicher, politischer und rechtlicher Ebene hemmt, um im nächsten Schritt markt- und akteurspezifische Konzepte und Lösungsansätze zu entwickeln.

Untersucht wurde die systemische Lenkungswirkung einer langfristigen CO₂-Bepreisung auf die Geschäftsmodelle von Sektorkopplungstechnologien und auf die

Verfügbarkeit von Flexibilität. Mit Stakeholdern wurden die Ursachen von langen Innovationszyklen und Informationsdefiziten analysiert und systematisiert.

Umfangreiche Transformationsmaßnahmen wie CO₂-Bepreisung, bessere Informationslage, strengere Vorgaben und Verbote sind notwendig, um eine hohe Sanierungstiefe und die Umrüstung auf intelligente Gebäudetechnik (Digitalisierung und vernetzter Betrieb der Gebäudeenergieanlagen) im Wärmebereich zu erreichen. Eine fast komplette Umstellung auf erneuerbare Energien (vor allem durch die Nutzung von Wärmenetzen und Wärmepumpen) und ein Ausstieg aus konventioneller Heiztechnik (basierend auf Öl und Gas) sind nur möglich, wenn gleichzeitig der Energiebedarf durch umfassende Sanierungsmaßnahmen reduziert wird.

In Einzelgebäuden werden neben Solar- und Geothermie oder Bioenergie insbesondere Wärmepumpen eine zentrale Rolle spielen. In verdichteten Räumen haben emissionsarme Wärmenetze, die verschiedene Quellen nutzen, ein großes Potenzial. Bei der industriellen Prozesswärme tragen geschlossene Stoffkreisläufe, der Einsatz erneuerbarer Energieträger, innovative Produktionsprozesse und CO₂-Nutzung zum Klimaschutz bei. Wenn erneuerbare Energien im Gebäude- und Industriebereich genutzt werden, wird die Nutzung von erneuerbarem Strom erhöht. Der Gesamtsbedarf an erneuerbarem Strom wird von 220 Terawattstunden in 2018 auf 800 bis 1000 Terawattstunden im Jahr 2050 ansteigen.

